

Workshop em Ciências da Terra e do Espaço 2018

# Workshop em Ciências da Terra e do Espaço

## Livro de Actas 2018

*Programa Doutoral em Ciências da Terra e do Espaço*

### Universidade de Évora

UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ISBN: 978-989-20-8414-5



UNIVERSIDADE DE ÉVORA  
INSTITUTO DE INVESTIGAÇÃO  
E FORMAÇÃO AVANÇADA



# QUALIDADE DA ÁGUA NO RESERVATÓRIO DE ALQUEVA ATRAVÉS DE MEDIÇÕES *IN SITU* E DETECÇÃO REMOTA DE SATÉLITE

GONÇALO RODRIGUES

*Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7000-671  
Évora, Portugal, grodrigues@uevora.pt*

MIGUEL POTES

*Instituto de Ciências da Terra (ICT), Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7000-671  
Évora, Portugal, mpotes@uevora.pt*

MARIA JOÃO COSTA

*Instituto de Ciências da Terra (ICT), Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7000-671  
Évora, Portugal, mjcosta@uevora.pt*

RUI SALGADO

*Instituto de Ciências da Terra (ICT), Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7000-671  
Évora, Portugal, rsal@uevora.pt*

ALEXANDRA PENHA

*Instituto de Ciências da Terra (ICT), Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7000-671  
Évora, Portugal, mapenha@uevora.pt*

MARIA NOVAIS

*Instituto de Ciências da Terra (ICT), Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7000-671  
Évora, Portugal, hnovais@uevora.pt*

Monthly in situ measurements obtained in Alqueva reservoir, ongoing since February 2016, of the following parameters were used: Secchi depth and spectral attenuation coefficient. In order to achieve reliable remote detection methods for continuous monitoring and good spatial coverage of physical parameters affecting the water quality of reservoirs such as Alqueva, data obtained from sensors on board satellites such as Sentinel-2 (MSI) were used. To obtain estimates of water quality parameters in Alqueva reservoir, regression analyses were performed between in situ observations and various combinations of spectral reflectances measured by the MSI with atmospheric correction. The water quality parameters were mapped in the Alqueva reservoir in order to have total coverage.

## 1 Introdução

A região do Alentejo, localizada a sul de Portugal, é a maior região de Portugal representando uma área de aproximadamente um terço da área do país.

A albufeira de Alqueva situada na região do Alentejo é uma barragem situada no rio Guadiana, sendo um dos maiores lagos artificiais da Europa quanto à área superficial (250 km<sup>2</sup>). Este reservatório é crucial no armazenamento de água para utilização nos períodos de



seca, para fins industriais, domésticos e agricultura. A qualidade da água é fundamental nestes fins, sendo atualmente monitorizada através de amostras recolhidas e analisadas em laboratório. No entanto esta monitorização apresenta limitações espaciais e temporais que impedem uma monitorização completa dos parâmetros de qualidade da água.

Com o rápido desenvolvimento da tecnologia de deteção remota nos últimos anos, o mapeamento dos parâmetros de qualidade da água nos lagos interiores e deteção de variações nos parâmetros de qualidade da água, tem sido cada vez mais realizada com recurso a imagens de satélite [1,2].

A obtenção de estimativas da qualidade da água diretamente da imagem de satélite também pode permitir a identificação rápida de *blooms* de algas, bem como das variações temporais e/ou espaciais dos parâmetros de qualidade da água. A monitorização da qualidade da água com recurso à deteção remota envolve normalmente a determinação de uma relação entre refletâncias em certas bandas de comprimento de onda (ou combinações de bandas) e os parâmetros da água recolhidos e medidos no local ou em laboratório, tais como concentrações de clorofila, cianobactérias, turbidez, matéria orgânica dissolvida ou profundidade do disco de Secchi [3,4,5].

Potes *et al.* ([6]) desenvolveu um método para estimar concentrações de clorofila *a* e cianobactérias sobre o Alqueva, combinando refletâncias à superfície no Alqueva com recurso ao satélite MERIS e análises de laboratório. Para além destes dois parâmetros, o mesmo autor utilizou imagens de satélite MERIS de forma a obter estimativas de turbidez na albufeira, permitindo avaliar variações espaciais e temporais deste parâmetro no reservatório de Alqueva [7].

A radiação, ao penetrar na coluna de água, é atenuada por substâncias presentes no meio que se podem encontrar sob a forma de partículas em suspensão (células de fitoplâncton, detritos minerais e partículas sedimentares) e matéria orgânica dissolvida, influenciando desse modo, a transparência da água e variando a profundidade máxima que a radiação consegue penetrar na coluna de água, denominado de camada fótica.

A obtenção da profundidade da camada fótica pode ser realizada através da relação empírica que existe entre si e a profundidade medida a partir do disco de Secchi. O disco é um material oceanográfico tradicionalmente branco e com 30 cm de diâmetro que é largado na coluna de água para medir a profundidade na qual este deixa de ser visível. Esta medida obtida denomina-se de profundidade de Secchi. O coeficiente de atenuação espectral mede a atenuação da luz solar ao penetrar na água devido à absorção e difusão das partículas nele contidos. Na exploração de métodos de deteção remota fiáveis para a monitorização, em contínuo e com uma boa cobertura espacial, de parâmetros físicos e biológicos que afetam a qualidade da água de albufeiras como a de Alqueva, os dados obtidos através das missões Sentinel-2 (MSI) serão uma grande mais-valia.

Para além da alta resolução espacial, com 4 bandas de 10 m, 6 bandas de 20 m e 3 bandas de 60 m, apresenta alta revisitação, com cobertura global sistemática na região da albufeira de Alqueva de 2 a 3 dias com os 2 satélites do Sentinel-2 em operação. Assim, os parâmetros relacionados com a qualidade da água medidos em locais pré-definidos no Alqueva,



combinados com dados de satélite, tem como objetivo permitir a monitorização da superfície da água e a detecção de eventos, tais como, o aparecimento e desenvolvimento de *blooms* de algas, e ainda, a criação de alertas.

## 2 Observações e metodologia

### 2.1 *Medições in situ de disco de Secchi e Coeficiente de atenuação espectral*

Desde fevereiro de 2016 têm sido efetuadas medições no reservatório de Alqueva do coeficiente de atenuação e profundidade de Secchi. Procurou-se efetuar medições que permitam monitorizar a qualidade da água, e as suas variações temporais e espaciais, tendo-se procedido à medição aproximadamente a cada 30 dias, e em vários pontos no reservatório de Alqueva. Na figura 1 apresenta-se o mapa da localização dos pontos de medição. Alamos\_Plat, Mourão\_Plat e Montante\_Plat representam medições efetuadas em plataformas instaladas na albufeira, que permitem medir parâmetros de qualidade da água em locais com maior profundidade e longe das margens. Os restantes pontos representam pontos de medição em ancoradouros, localizados nas margens da albufeira.

Foram ainda efetuadas medições de barco, nomeadamente entre o ancoradouro de Montante (MontanteA) e a plataforma de Montante (Montante\_Plat).

A profundidade de Secchi mede a transparência da água e durante as medições obtiveram-se extremos de 0.4 m e 5 m de profundidade de Secchi. O coeficiente de atenuação espectral mede a dispersão da radiação pelas partículas presentes na água, obtendo-se valores compreendidos entre  $0.4 \text{ m}^{-1}$  e  $2.0 \text{ m}^{-1}$ . Os valores extremos de baixa transparência da água e alta atenuação da radiação solar na coluna de água, foram medidos no ancoradouro de Monsaraz no dia 19 de setembro de 2017, coincidindo com um evento de *bloom* de algas.

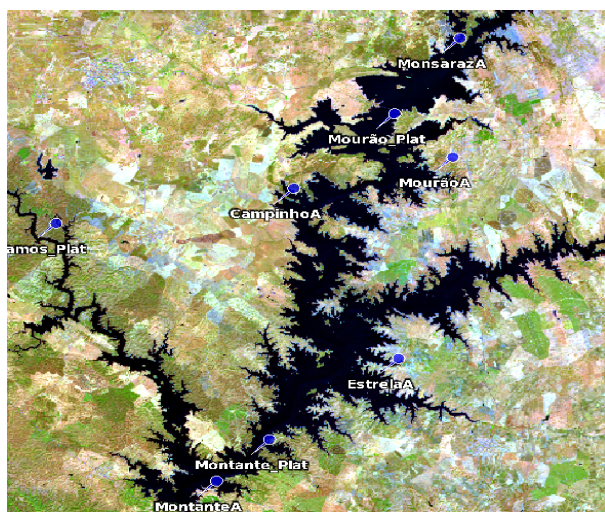


Figura 1. Localização dos pontos de medição no reservatório de Alqueva.



## 2.2 *Sentinel 2 – MSI*

O Instrumento MSI (MultiSpectral Instrument) a bordo do Sentinel-2 apresenta 13 bandas espectrais (visível, infravermelho próximo e infravermelho curto) com elevada resolução espacial, tendo 4 bandas com resolução de 10 m, seis bandas de 20 m e três bandas de 10m [8]. Este apresenta ainda boa resolução temporal com 2 - 3 dias de revisitação na área onde a albufeira de Alqueva se insere. Utilizou-se o algoritmo Sen2Cor desenvolvido pela ESA (European Space Agency) para converter as imagens do topo da atmosfera em refletâncias à superfície, com correção de cirrus no canal 1375 nm, vapor de água baseado nas bandas B8A e B9 (865 nm, 945 nm) e aerossóis [9].

O instrumento MSI do Sentinel 2 devido à sua elevada resolução espacial e temporal, permite a deteção de *blooms* de algas, sendo o índice *Maximum Chlorophyll Index* (MCI) um dos índices mais utilizados para esse efeito. Este índice é um indicador da quantidade de clorofila presente na água e tem sido explorado como uma ferramenta muito útil na identificação e monitorização de *blooms* de algas nos lagos interiores. No Sentinel-2 este índice é calculado com base nas bandas dos 665, 705 e 740 nm (banda 4, 5 e 6, respetivamente).

## 2.3 *Metodologia*

Os parâmetros considerados para a caracterização da qualidade da água foram o coeficiente de extinção e profundidade de Secchi. De forma a ter a iluminação adequada a estas medições, procurou-se limitar as medições diárias ao período entre as 10:00 h e as 16:00 h UTC. Vários estudos referem entre 3 a 8 dias como o tempo máximo utilizado entre medições no local e imagens de satélite para uma correta comparação, com condições meteorológicas estáveis e sem desenvolvimento de *blooms* de algas. [10,11]. No presente estudo, apenas foram selecionadas as imagens de satélite com diferença máxima de 1 dia em relação às medições *in situ* e em condições de céu limpo. Para obter os valores da refletância à superfície (nível L2A), o módulo de correção atmosférica Sen2Cor foi aplicado ao produto do nível L1C associado.

Relativamente à imagem MSI, selecionaram-se os 4 pixéis água mais próximos ao local de medição, sem influência dos pixéis adjacentes de terra, calculando-se o valor médio das refletâncias dos quatro pixéis selecionados. Finalmente, utilizaram-se de forma empírica algoritmos para estimar o coeficiente de extinção e profundidade de Secchi, relacionando as refletâncias à superfície obtidas das imagens de satélite com as medições no local.

Procedeu-se ainda à espacialização dos parâmetros de qualidade da água no reservatório de Alqueva de forma a ter cobertura total e não apenas pontual.

Para isso, utilizou-se as equações encontradas que melhor relacionam as bandas do MSI e medições *in situ*, calculando-se assim, as estimativas dos parâmetros de qualidade da água pixel a pixel. Na elaboração/análise de mapas e processamento estatístico recorreu-se à ferramenta SNAP disponibilizada pela ESA e à linguagem de programação Python. [12]



### 3 Resultados e discussão

#### 3.1 Algoritmos empíricos relacionando medições *in situ* e Sentinel-2

Relacionaram-se as refletâncias à superfície obtidas através do Sentinel-2 com medições de profundidade de Secchi e coeficiente de atenuação espectral, procurando empiricamente as melhores relações, tendo como fator de seleção o maior coeficiente de correlação. Na figura 2 e figura 3 mostram-se as relações e os algoritmos que melhor relacionam as refletâncias à superfície obtidas de satélite com medições no local. Para ambos os parâmetros, as relações com as bandas no visível apresentaram melhores resultados do que comparando com as bandas associadas a elevados comprimentos de onda.

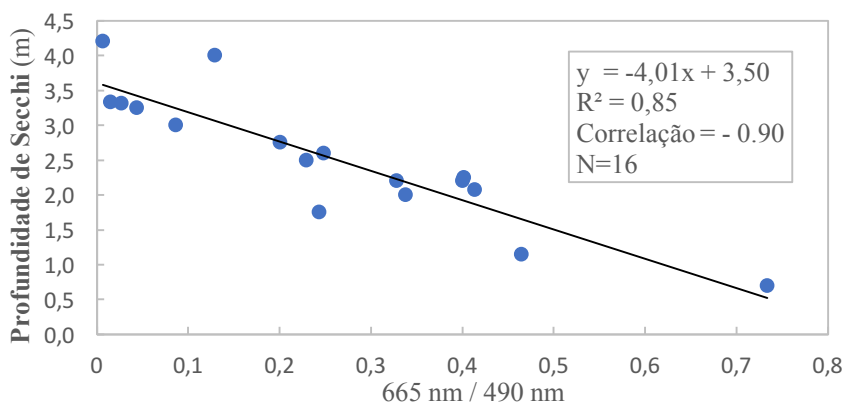


Figura 2. Relação entre a profundidade de Secchi (m) e a razão entre a banda 4 (665 nm) e a banda 2 (490 nm) do Sentinel-2.

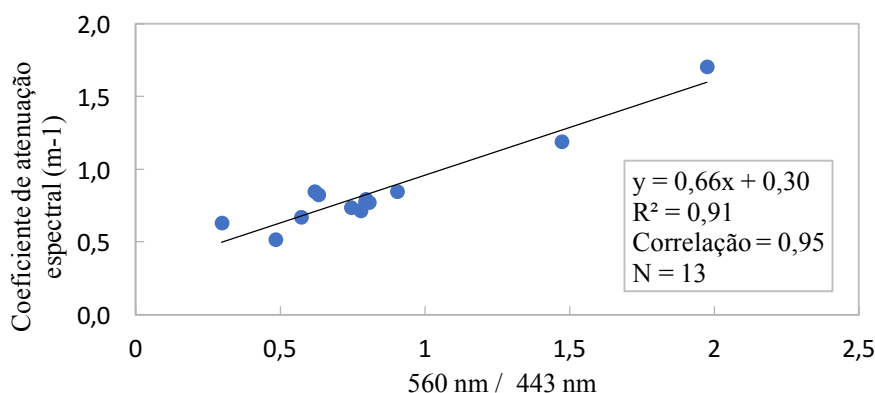


Figura 3. Relação entre o coeficiente de atenuação espectral (m<sup>-1</sup>) e a razão entre a banda 3 (560 nm) e a banda 1 (443 nm) do MSI.

Vários autores aferiram boas relações com altas correlações entre a transparência da água medida a partir do disco de Secchi, e a refletância na banda do azul e do vermelho [13].

Neste trabalho o melhor algoritmo encontrado na relação entre refletâncias à superfície através de imagens de satélite e medições da profundidade de Secchi foi também obtido para as bandas do azul e do vermelho, que no caso do Sentinel-2 é a banda 2 (centrada aos 490 nm) e a banda 4 (centrada nos 665 nm) respectivamente. Esta relação com a razão entre a banda do vermelho e do azul apresenta um elevado coeficiente de determinação e coeficiente de correlação na ordem de 0,9 (Figura 2).

As regiões espectrais correspondentes ao verde (centrado nos 560 nm) e ao azul escuro (443 nm) foram os que apresentaram melhores resultados na comparação com dados medidos de coeficiente de atenuação espectral, com coeficiente de determinação de 0,9 e correlação de 0,95. Dos 13 pontos considerados na comparação refira-se os valores extremos de dia 19 de setembro de 1.2 e 1.7 de coeficiente de atenuação espectral nos ancoradouros da Estrela e Monsaraz respectivamente, permitindo assim estimar o algoritmo com extremos, representando estes um período de fraca qualidade da água, associada à grande presença de algas.

### 3.2 Caso de estudo – Evento de bloom de algas

No Verão de 2017 desenvolveu-se um *bloom* de algas no reservatório de Alqueva, sendo que em agosto afetou a área principalmente na região mais a norte do Alqueva e nas margens à direita do reservatório (Figura 1). O *bloom* continuou a progredir para Sul, afetando em setembro e até meados de outubro praticamente toda a albufeira.

Com recurso ao Sentinel-2 é possível identificar o *bloom* de algas com recurso à imagem RGB (Figura 4 à esquerda) e com o índice *Maximum Chlorophyll Index*. Identifica-se nesta figura de dia 2 de outubro a boa capacidade do índice MCI em identificar os *blooms* de algas, com valores elevados deste índice a coincidir com locais de presença de algas na imagem RGB (Píxeis a verde).

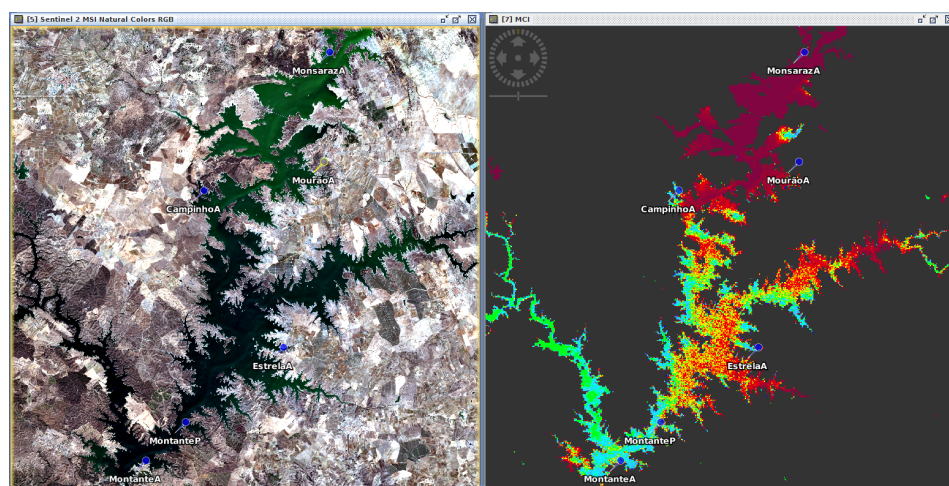


Figura 4. Imagem RGB (Esquerda) e índice *Maximum Chlorophyll Index* (Direita), dia 2 de outubro de 2017.



A presença de algas associada ao aumento de organismos fotossintéticos presentes na água tendem a fazer diminuir a transparência da água, aumentando também a sua turbidez. Espera-se, portanto, nessas condições uma diminuição da profundidade de Secchi (Associada à diminuição da transparência da água) e um aumento no coeficiente de atenuação espectral da água devido ao aumento da atenuação da radiação solar na coluna de água.

O mapeamento da profundidade de Secchi e coeficiente de atenuação espectral foi obtido utilizando as equações apresentadas que melhor relacionam as refletâncias à superfície obtidas através do MSI e medições no local, calculando pixel a pixel as estimativas dos parâmetros analisados para o dia 2 de outubro.

A figura 5 representa os mapas de profundidade de Secchi e coeficiente de atenuação espectral para dia 2 de outubro obtidos com recurso aos algoritmos desenvolvidos e explicados no sub-capítulo anterior, e aplicados para todos os pixels 100% água da albufeira, sem presença de nuvens, nem efeitos de reflexão dos pixels adjacentes de terra.

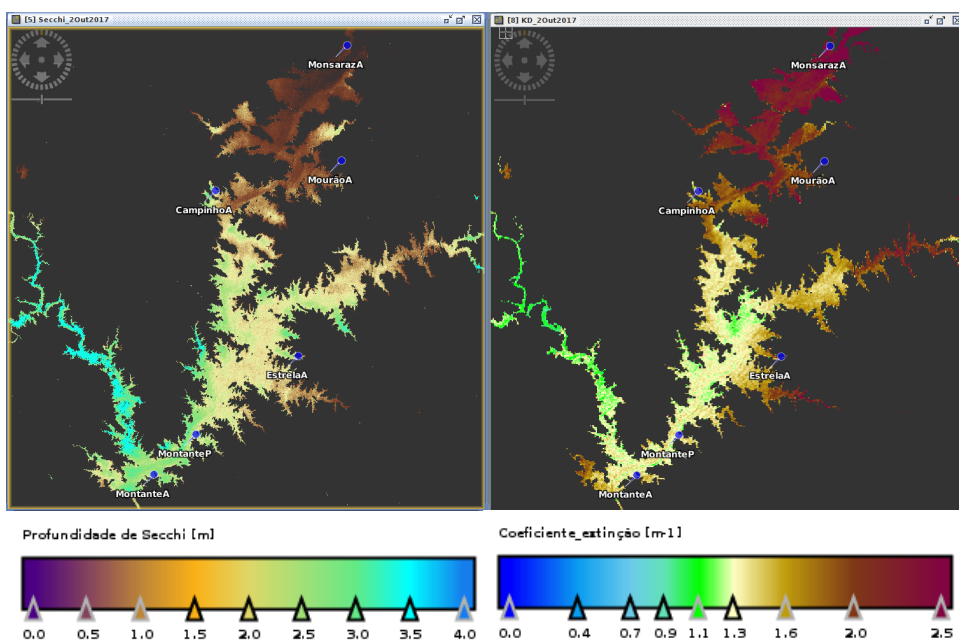


Figura 5. Mapa de Profundidade de Secchi (Esquerda) e de coeficiente de atenuação espectral (Direita), dia 2 de outubro de 2017

Verifica-se pela figura 5 valores muito elevados do coeficiente de atenuação espectral e baixas profundidades de Secchi entre Campinho e Monsaraz, e também nas margens à direita da albufeira. A área apresentando estimativas de melhor qualidade da água é encontrada para o ramal mais a Oeste da Albufeira, com estimativas de profundidade de Secchi superiores a 3 m e de coeficiente de extinção inferiores a  $1.3 \text{ m}^{-1}$ . Este facto estará provavelmente associado à não propagação do *bloom* de algas para este local, tendo assim menores partículas

dissolvidas, água com maior transparência (Maior profundidade de Secchi) e menor atenuação da radiação solar na coluna de água.

Verificando a relação entre os locais de maior presença de algas (Figura 4) com os de menores valores de profundidade de Secchi e valores de coeficiente de atenuação espectral mais elevados (Figura 5) identifica-se este como um bom indicador para estimar os dois parâmetros de qualidade da água analisados através dos algoritmos empíricos obtidos.

#### 4 Conclusões e trabalhos futuros

Desenvolveu-se uma metodologia baseada em imagens do Sentinel-2, relacionando refletâncias à superfície medidas com este satélite com medições *in situ* da profundidade de Secchi e coeficiente de atenuação espectral.

O algoritmo empírico proposto para estimar o coeficiente de extinção espectral na albufeira de Alqueva, baseado nas refletâncias à superfície do Sentinel-2, apresenta uma relação linear entre a razão de refletâncias da banda na região do verde (560 nm) e a do azul escuro (443 nm), com medições no local, apresentando um elevado coeficiente de determinação de 0,9 e correlação de 0,95. O algoritmo proposto para estimar a profundidade de Secchi na albufeira apresenta também uma relação linear entre refletâncias à superfície obtidas através de imagens de satélite e as medições no local, com a razão entre as bandas do vermelho (665 nm) e do azul (490 nm) aquelas que apresentam melhores resultados, com um coeficiente de determinação de 0,85 e correlação de 0,9.

Encontram-se ainda em curso, as medições mensais de profundidade de Secchi e do coeficiente de atenuação espectral, o que permitirá ter um período adequado de medições para a validação dos algoritmos empíricos obtidos.

No entanto, como apresentado, no evento de *bloom* de algas do dia 2 de outubro, o facto de se observarem valores baixos de profundidade de Secchi e valores elevados de coeficiente de atenuação espectral nos locais com maior presença de algas, será um forte indício da boa estimativa através dos algoritmos empíricos obtidos.

Um importante factor na utilização de dados de satélite, para aplicações nos lagos interiores, é o processo de correção atmosférica. Nesse sentido, como trabalho futuro, será feita a comparação da correção atmosférica feita pela ESA para os produtos do Sentinel-2 MSI com outros processos, como por exemplo, recorrendo-se a dados da AERONET para obtenção de vapor de água na coluna e aerossóis.

Apresenta-se ainda como trabalhos futuros, a obtenção de estimativas de qualidade da água com recurso a outros satélites como o instrumento OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) do Sentinel 3.

Pretende-se por fim, definir e relacionar variações nos parâmetros de qualidade da água com alterações nas condições meteorológicas, nomeadamente com o vento, a precipitação, a temperatura do ar e a radiação solar.



## Agradecimentos

Este trabalho é co-financiado pelo COMPETE 2020 através do projeto FCT (UID / GEO /04683/2013) com a referência POCI-01-0145-FEDER-007690, pelo projeto ALOP (ALT20-03-0145-FEDER-000), e ainda, pelo Programa Doutoral em Ciências da Terra e do Espaço.

## Referências

1. Barrett, D.; Frazier, A. Automated Method for Monitoring Water Quality Using Landsat Imagery. *Water* 2016, 8, 257
2. Chandrasekar, K.; Sessa Sai, M.V.R.; Roy, P.S.; Dwevedi, R.S. Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS Vegetation Index product. *Int. J. Remote Sens.* 2010, 31, 3987–4005
3. Allan, M.G.; Hamilton, D.P.; Hicks, B.J.; Brabyn, L. Landsat remote sensing of chlorophyll *a* concentrations in central North Island lakes of New Zealand. *Int. J. Remote Sens.* 2011, 32, 2037–2055
4. Nas, B.; Ekerin, S.; Karabork, H.; Berkay, A.; Mulla, D.J. An application of Landsat-5TM image data for water quality mapping in Lake Beysehir, Turkey. *Water Air Soil Pollut.* 2010, 212, 183–197.
5. Nechad, B.; Ruddick, K.G.; Park, Y. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. *Remote Sens. Environ.* 2010, 114, 854–866.
6. Potes, M.; Costa, M. J.; Silva, J. C. B.; Silva, A. M., and Morais, M.: Remote sensing of water quality parameters over Alqueva reservoir in the south of Portugal, *Int. J. Remote Sens.*, 32, 3373– 3388, 2011.
7. Potes, M.; Costa, M. J. and Salgado, R. 2012. Satellite remote sensing of water turbidity in Alqueva reservoir and implications on lake modeling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 1623–1633.
8. Drusch, M.; Del Bello, U.; Carlier, S.; Colin, O.; Fernandez, V.; Gascon, F.; Hoersch, B.; Isola, C.; Laberinti, P.; Martimort, P. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sens. Environ.* 2012, 120, 25–36
9. Uwe,M.-W.; Jerome,L.; Rudolf,R.;Ferran,G.;Marc,N. Sentinel-2 Level 2a Prototype Processor: Architecture, Algorithms and First Results. In Proceedings of the ESA Living Planet Symposium, Edinburgh, UK, 9–13 September 2013.
10. Kloiber, S.M.; Brezonik, P.L.; Olmanson, L.G.; Bauer, M.E. A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data. *Remote Sens. Environ.* 2002, 82, 38–47.
11. Olmanson, L.G.; Bauer, M.E.; Brezonik, P.L. A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota's 10,000 lakes. *Remote Sens. Environ.* 2008, 112, 4086–4097.
12. Python Software Foundation (PSF). Python Language Reference; PSF: Wilmington, DE, USA, 2014.
13. P. L. Brezonik, L. G. Olmanson, M. E. Bauer, and S. M. Kloiber, "Measuring Water Clarity and Quality in Minnesota Lakes and Rivers: A Census-Based Approach Using Remote-Sensing Techniques," *Cura Report.*, pp. 3–13, 2007.

